

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ДАННЫХ
ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ**

П.Н. Александров*, О.Б. Забинякова**
*(*ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Троицк, **ИС РАН, Бишкек)*

**A SYSTEMATIC APPROACH TO THE ANALYSIS OF GEOPHYSICAL MONITORING DATA OF
MODERN GEODYNAMIC PROCESSES**

P.N. Alexandrov*, O.B. Zabinyakova**
*(*GEMRC IPE RAS, Troitsk, **RS RAS, Bishkek)*

**Знания, не сведенные в систему, бесполезны.
Академик В.Н.Страхов**

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Объектом исследования геофизического мониторинга современных геодинамических процессов являются любые изменения в геологической среде (естественного или техногенного характера), происходящие в настоящее время и отражающиеся в физических полях и физических параметрах горной породы, в частности, электромагнитных.

Целью как геофизического, так и в частности электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов является изучение изменений в геологической среде, их оценка и прогноз развития.

Задачи электромагнитного мониторинга:

1. Исследование характера проявления в электромагнитных параметрах и электромагнитных полях современных геодинамических процессов не электромагнитного происхождения.
2. Разработка систем наблюдения за современными геодинамическими процессами.
3. Разработка подходов к обработке данных электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов.
4. Физико-геологическая интерпретация результатов электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов.

3. Разработка подходов к обработке данных электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов.

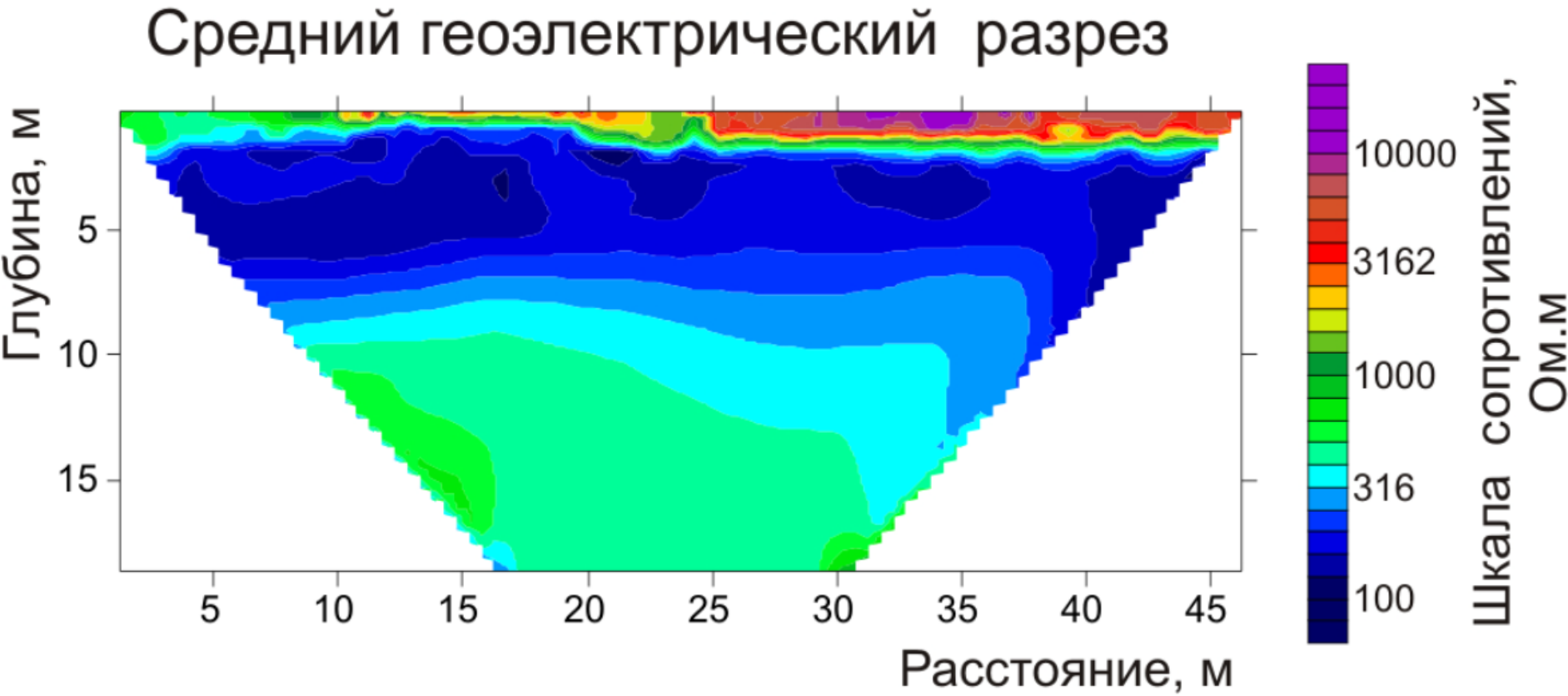
Под системой будем понимать совокупность отдельных элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом и образующих новую качественную целостность.

Любую систему можно условно разделить на подсистемы: стационарные системы, не меняющиеся во времени, и нестационарные, динамические системы меняющиеся во времени.

Стационарные системы это средний по времени разрез, не меняющийся (либо слабо меняющийся) во времени под воздействием внешних факторов не электромагнитного происхождения.

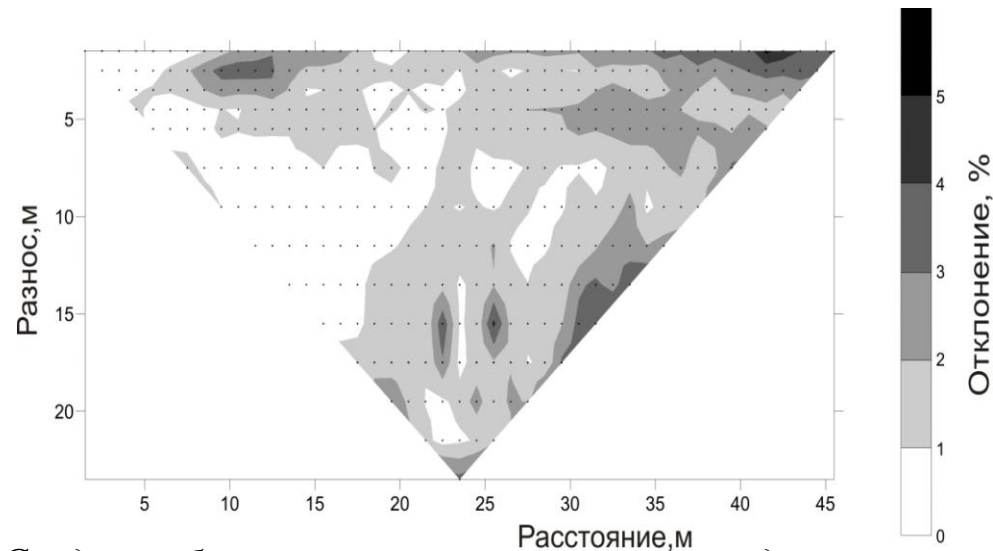
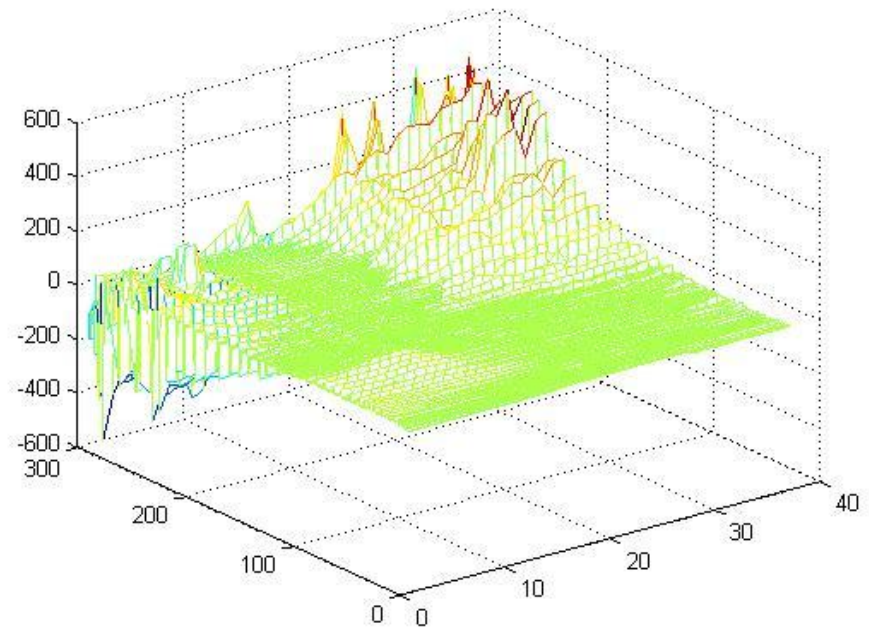
Динамические системы - области или элементы геоэлектрического разреза, реагирующие на внешние воздействия.

Обработка данных электротомографического мониторинга, основанного на системном анализе временных рядов, выполненного на полигоне Александровка. Продолжительность мониторинга 39 часов, интервал наблюдений 2 часа.



Исходные (полевые) данные за вычетом средних по времени в каждой пространственной точке наблюдения.

Работы выполнены на Александровском геофизическом полигоне, расположенном в Юхновском районе Калужской области. Профиль исследования длиной 47 м расположен на территории научной базы Геологического факультета МГУ непосредственно возле скважины, пробуренной с учебно-методической целью. Верхняя часть геологического разреза (около 10.5 м) представлена дисперсными терригенными отложениями Московского оледенения преимущественно суглинистого и супесчанистого состава. При этом сверху залегает слой флювиогляциальных песков мощностью 2 м. Нижняя часть разреза до глубины 20 м представлена переслаиванием преимущественно известняков (82%), глин нижнего карбона(13%) и песка (5%).



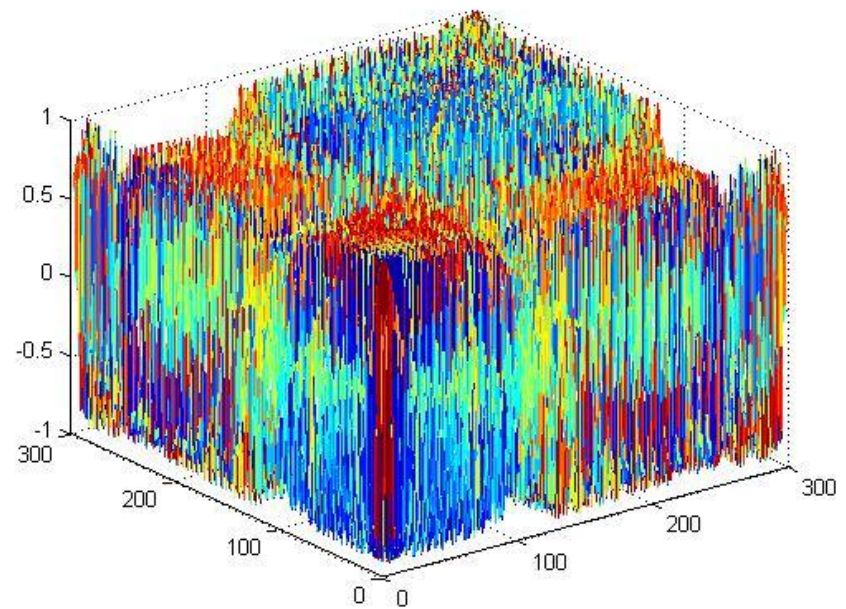
Средние абсолютные отклонения на псевдоразрезе кажущегося сопротивления.

Системный анализ временных рядов. Из формальных соображений (как это будет следовать из нижеизложенного), а также из смысловых, получить новую качественную информацию можно используя независимую информацию, поскольку в противном случае, непосредственно связанные, коррелируемые процессы не приводят к получению качественно новой информации. Иначе говоря, необходимо использовать те временные ряды, которые непосредственно не зависят, а зависят опосредовано, через параметры системы. Мерой линейной независимости (или зависимости) двух функций времени является коэффициент корреляции.

В связи с этим найдем матрицу коэффициентов корреляции $K = \{k_{ij}\}$ по наблюдаемым данным, где

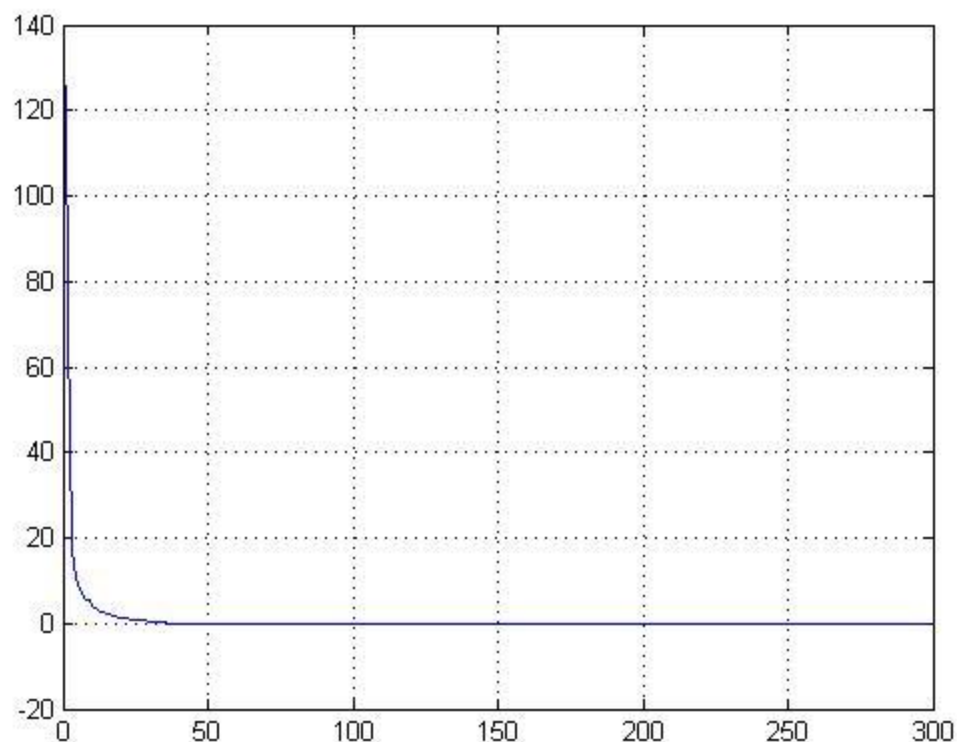
$$k_{ij} = \frac{\int_a^b f_i(t) f_j(t) dt}{\int_a^b f_j(t) f_j(t) dt}, \quad i = \{1:N\}, \quad j = \{1:N\}, \quad N -$$

количество точек наблюдения.



Матрица коэффициентов корреляции между всеми временными рядами.

Матрица K - симметричная, ее можно представить в виде $K = v[\lambda]v^{-1}$, где v - матрица, составленная из собственных векторов матрицы K , $[\lambda]$ - диагональная матрица собственных значений матрицы K . На рисунке изображены собственные значения матрицы K .

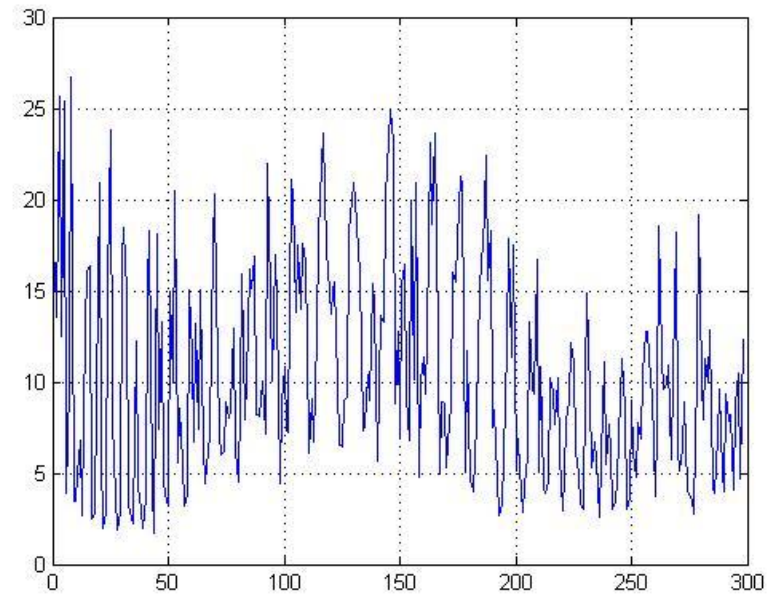


Выделим из этой матрицы матрицу с минимальной корреляцией. Для этого представим ее собственные значения $[\lambda] = \begin{bmatrix} [\lambda_+] & [0] \\ [0] & [\lambda_-] \end{bmatrix}$, где $[\lambda_+]$ - диагональная матрица с большими, по модулю, величинами собственных значений матрицы K , $[\lambda_-]$ - диагональная матрица с малыми, по модулю, величинами собственных значений матрицы K , например, не превышающих по абсолютной величине $0.1 \max(|\lambda|)$, $[0]$ - нулевая матрица соответствующей размерности.

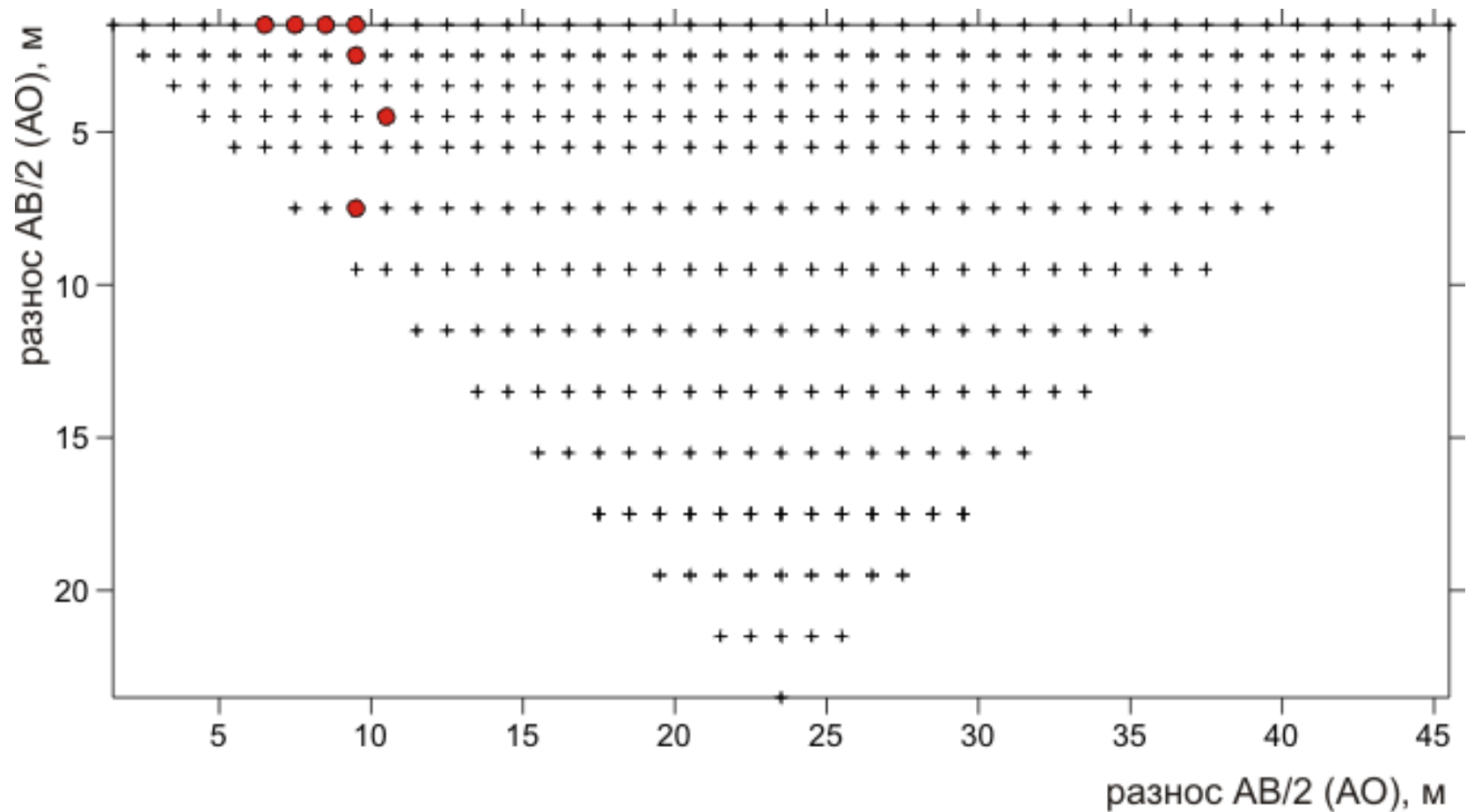
Тогда матрица K_N с некоррелированными функциями времени можно найти из

$$K_N = v \begin{bmatrix} 0 \cdot [\lambda_+] & [0] \\ [0] & [\lambda_-] \end{bmatrix} v^{-1} = v \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [\lambda_-] \end{bmatrix} v^{-1}$$

В результате этой операции можно выделить функции времени $f_i(t)$, которые обладают наименьшей коррелированностью и, следовательно, наименьшей линейной зависимостью друг от друга. Для этого просуммируем по столбцам модули элементов матрицы K_N и выберем некоторое количество минимальных значений полученного ряда.



В результате этой процедуры отобраны такие функции времени $f_i(t)$ (соответствующие пространственным точкам наблюдения), которые являются максимально независимыми. Их номера {44, 28, 39, 22, 35, 34, 17}. Это необходимо для построения математической модели системного анализа временных рядов - динамической задачи. Здесь представлены те области геоэлектрического разреза, которые удовлетворяют этим требованиям.



Динамическая задача. После того, как отобраны функции $f_i(t)$ (пусть они образуют количество m , по экспериментальным данным

их 7), их можно свести в вектор-функцию времени $X(t) = \begin{pmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \dots \\ f_m(t) \end{pmatrix}$. Тогда можно предположить, что в близких интервалах времени

существует линейная связь

$$X(t + \Delta t) = AX(t) = ([1] + \Delta t B)X(t) \quad (1)$$

B - матрица, характеризующая изучаемую систему: $[1]$ - единичная матрица соответствующей размерности.

В выражении (1) вектор $X(t)$ есть воздействие на систему, вектор $X(t + \Delta t)$ результат воздействия на систему. Они могут меняться достаточно произвольным образом. Однако матрица B , описывающая систему, не меняется в интервале времени ΔT , образующего кадр. Она полностью описывает внутреннюю структуру, состояние и свойства. Для нахождения B матрицы представим систему уравнений в виде

$$Y = Y(t) = X(t + \Delta t) - X(t) = B\Delta t X(t).$$

Перейдем к дискретным представлениям. Иначе говоря, перейдем от функций времени к временным рядам. Пусть известны вектора $Y(t_j)$ и $X(t_j)$ в момент времени t_j . Введем составные матрицы

$$Y = [Y(t_1), Y(t_2), \dots, Y(t_n)]; \quad X = [\Delta t_1 X(t_1), \Delta t_2 X(t_2), \dots, \Delta t_n X(t_n)]; \quad n \gg m,$$

Δt_j , $j=1, n$ - интервалы времени, через которые были проведены измерения и которые могут быть различными, n - количество измерений. Интервал времени $t_n - t_1 = \Delta T_n$ - кадр, интервал времени, в течении которого произведено n измерений. В расчетах использовались следующие значения $m=7$, $n=15$.

Тогда векторная система уравнений сведется к матричной системой уравнений относительно матрицы B вида

$$Y = BX \quad (2)$$

из которой можно найти матрицу B .

Полученная матричная система уравнений является переопределенной. В силу этого решение будет иметь вид

$$B = ((XX^T)^{-1}(XY^T))^T = VDV^{-1}$$

где T - знак операции транспонирования матрицы, где V - матрица, составленная из собственных векторов матрицы B , $[D]$ - диагональная матрица собственных значений матрицы B .

Необходимо, чтобы матричная система уравнений (2) была переопределенной, поскольку это позволит оценить точность построенной математической модели согласно оценки $O = \|Y - BX\|$. В противном случае, например, при нормально определенной системе матричных уравнений, оценить точность построенной модели не представляется возможным, поскольку всегда оценка O будет равна нулю $O=0$.

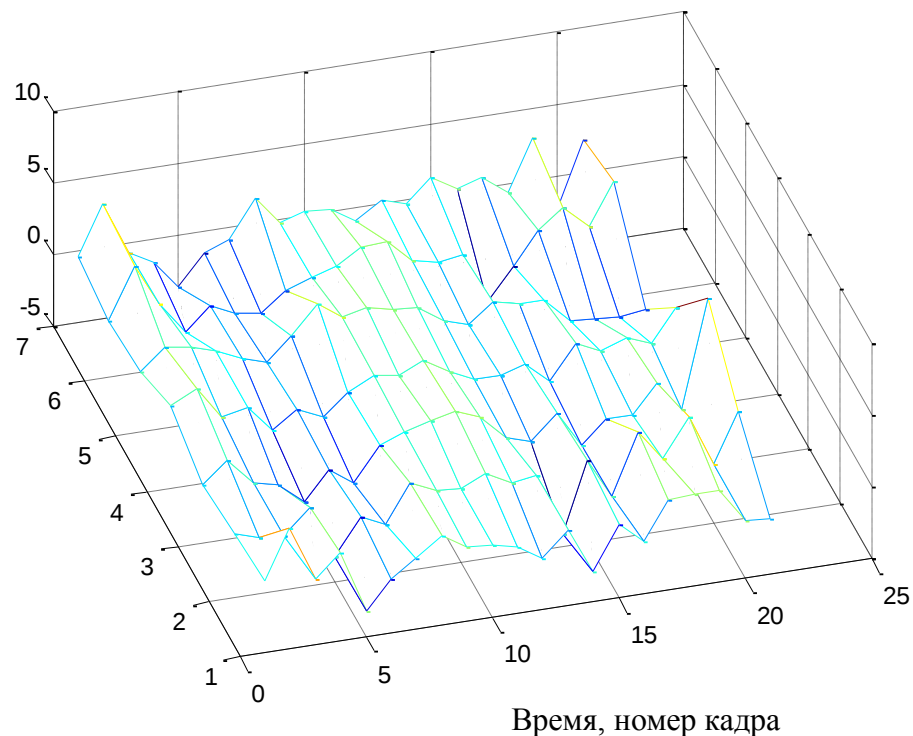
Найденная матрица позволяет осуществить прогноз развития геодинамического процесса на последующий момент времени t_{n+1} согласно выражению, вытекающего из (1)

$$\mathbf{X}(t_{n+1}) = ([1] + (t_{n+1} - t_n)B)\mathbf{X}(t_n).$$

Если в момент времени t_{n+1} известен вектор $\tilde{\mathbf{X}}(t_{n+1})$, то можно определить отклонение прогнозных значений от фактических $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X}(t_{n+1}) - \tilde{\mathbf{X}}(t_{n+1})$. Если изменения $\Delta\mathbf{X}$ в разных точках пространства происходят синхронно, то это означает, что в данный момент происходит изменение всей системы. В противном случае, изменение системы не происходит и они связаны с другими факторами, такими, например, как помехи.

Далее сдвинув все данные на шаг дискретизации, сдвинув кадр на одно измерение, интервал времени которого будет $\Delta T_{n+1} = t_{n+1} - t_2$, и проведя всю описанную выше процедуру нахождения матрицы B , получим временной ряд отклонений прогнозных значений от фактических по всем оставшимся временным рядам.

Как следует из последнего рисунка, изменения происходят синхронно. Это означает, что система меняется во времени - имеет место геодинамический процесс.



Вектор геодинамических процессов. Введем понятие вектора геодинамических процессов. Известно, что сила - векторная величина, которая характеризуется модулем (величина этой силы) и направлением (направление действия этой силы). Аналогично для матрицы B : собственные значения - величины, характеризующие мощность геодинамического процесса, собственные вектора - направление действия геодинамического процесса. Векторную величину $G = \sum_{i=1}^n d_i V_i$ назовем вектором

современных геодинамических процессов в момент времени t , полученный за предыдущий интервал времени наблюдений ΔT (используя ретроспективные данные), где d_i - собственное значение и соответствующий ему собственный вектор V_i матрицы B , $[V_1, V_2, \dots, V_n] = V$. ΔT - есть интервал времени вычисления матрицы B , которая приписывается времени t , - времени современного геодинамического процесса. Он смещается каждый раз, когда производятся измерения в последующие моменты времени и остается постоянным. Фактически это означает, что ΔT есть скользящий интервал времени.

Вектор современных геодинамических процессов является суммой отдельных векторов геодинамических процессов. Отдельный вектор геодинамических процессов определяется направлением (собственный вектор единичной длины), и величиной - соответствующим собственным значением. Его длина есть модуль собственного значения. Соответственно, вектор современных геодинамических процессов будет характеризовать величину этого процесса (его энергетику) в целом, и их направленность как сумма отдельных геодинамических процессов.

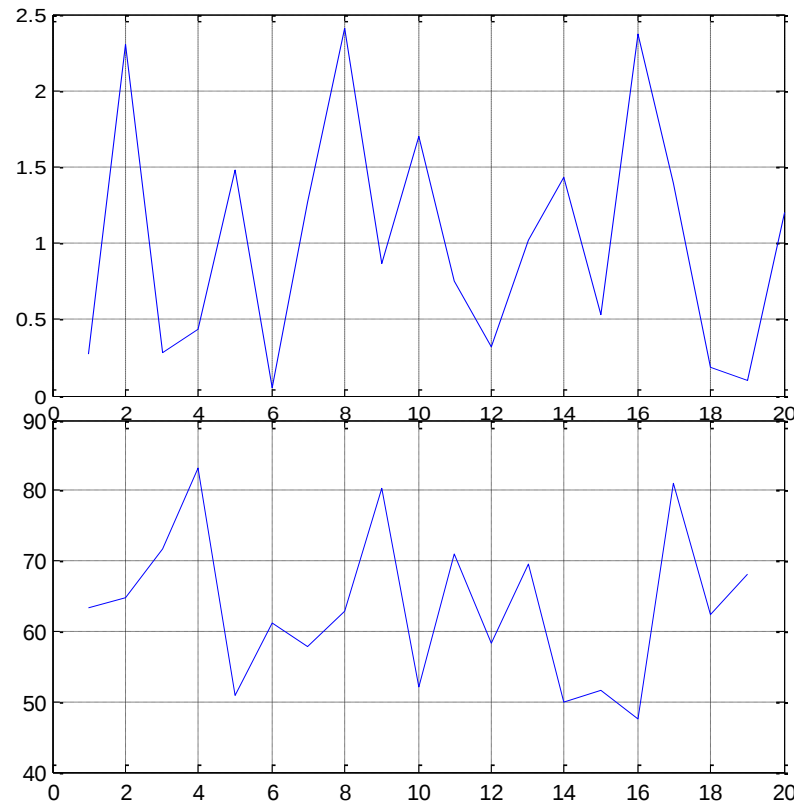
В силу измерений в конечные интервалы времени следует рассматривать относительные величины. Для двух векторов, полученных в моменты времени t_j и t_{j-1} , изменение во времени геодинамических процессов опишем как скалярное произведение двух векторов $G_j G_{j-1} = |G_j| |G_{j-1}| \cos(\Delta\varphi_j)$.

В силу измерений в конечные интервалы времени следует рассматривать относительные величины. Для двух векторов, полученных в моменты времени t_j и t_{j-1} , изменение во времени геодинамических процессов опишем как скалярное произведение двух векторов $\mathbf{G}_j \mathbf{G}_{j-1} = |\mathbf{G}_j| |\mathbf{G}_{j-1}| \cos(\Delta\varphi_j)$.

Введем отношение модулей вектора $\Delta E_j = \frac{|\mathbf{G}_j|}{|\mathbf{G}_{j-1}|}$, которое указывает на изменение энергетики (мощности) геодинамического процесса, и разность $\Delta\varphi_j = \varphi_j - \varphi_{j-1}$ - изменение направлений (структурно-текстурного строения) этих процессов. Тогда

$$\mathbf{G}_j \mathbf{G}_{j-1} = |\mathbf{G}_j| |\mathbf{G}_{j-1}| \cos(\Delta\varphi_j) = \frac{|\mathbf{G}_j|}{|\mathbf{G}_{j-1}|} |\mathbf{G}_{j-1}|^2 \cos(\Delta\varphi_j) = \Delta E_j |\mathbf{G}_{j-1}|^2 \cos(\Delta\varphi_j)$$

Как следует из рисунков, между ΔE_j и $\Delta\varphi_j$ существует причинно-следственная связь. Изменение внутренней энергии системы приводит к изменению ее структурно-текстурного строения. Это изменение происходит с задержкой по времени. Иными словами, нельзя изменить структуру системы прежде не изменив ее внутреннюю энергию.



$$\Delta E_j = \frac{|\mathbf{G}_j|}{|\mathbf{G}_{j-1}|}$$

$$\Delta\varphi_j$$

Выводы. Рассмотренный подход к анализу геодинамических процессов легко распространяется на случай комплексного анализа при исследовании современных геодинамических процессов с использованием различных физических полей: сейсмических, термических и т. п., синхронизированных по времени. Он также может быть использован при комплексном анализе геофизических данных в разведочной геофизике.

Рассмотренный подход позволяет ставить и исследовать следующие вопросы: какова должна быть длительность полевых исследований по изучению конкретного геодинамического процесса, каков должен быть шаг дискретных во времени измерений, какие точки в пространстве должны исследоваться при решении конкретной задачи мониторинга современных геодинамических процессов. Эти вопросы могут получить ответ при развитии настоящего подхода основанного на формальном анализе динамических систем. Однако, он лишен физико-геологического смысла. В связи с этим, актуальным является развитие теории и практики мониторинга современных геодинамических процессов на физико-геологической основе, что будет являться предметом дальнейших исследований.

При исследовании систем, в том числе и динамических, широко используется теория графов, позволяющая устанавливать связи между отдельными частями этой системы и анализировать как взаимовлияние этих частей друг на друга, так и динамику всей системы в целом. В связи с этим окончательная интерпретация результатов, полученных по предложенному подходу, будет осуществляться с использованием этой теории и имеющейся геолого-геофизической информацией.

Спасибо за внимание!